CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS
(C.R.T.)
CENTRE FOR RESEARCH ON TRANSPORTATION

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES COMMERCIALES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS
UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
C.P. 6128, SUCCURSALE A.
MONTRÉAL
CANADA H3C 3J7

TÉLÉPHONE: (514) 343-7575
TÉLEX: 05-24146 BIBPOLYTEC
EMAIL: crt@crt.umontreal.ca
TÉLÉCOPIEUR (FAX): (514) 343-7121

CRT-686

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES SYSTÈMES EXPERTS APPLIQUÉS À L'ENTRETIEN DE L'INFRASTRUCTURE ROUTIÈRE

par

Bernard Lefebvre[1]
Daniel Ferrero[2]

Rapport présenté au Conseil de la recherche et du développement en transport (C.R.D.T.).

[1] Département d'informatique et de recherche opérationnelle et Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

[2] Département d'informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal.

Centre de recherche sur les transports - Publication #686

Février 1990

90-04329/

Dépôt légal - 1er trimestre 1990

RÉSUMÉ

Cette recherche bibliographique a pour objectif l'identification des principaux systèmes experts, en Europe, aux États-Unis et au Canada qui oeuvrent dans le domaine de la gestion et de l'entretien du réseau routier. Dans la mesure du possible, on a cherché à obtenir une présentation aussi uniforme que possible mettant en évidence les buts, motivations et principaux aspects méthodologiques. Les systèmes ont été regroupés en trois catégories : les prctotypes opérationnels, en développement ou à l'état de projet. Ceux qui ont été retenus dans cette étude comme étant les plus significatifs et les plus avancés dans ce domaine sont :

- SCEPTRE, OVERDRIVE et PARADIGM qui ont été développés à l'institut de recherche sur les transports de l'Université de Irvine en Californie, U.S.A.,
- ERASME, un système créé par le Centre d'Études Techniques de L'Équipement Méditerranée en France,
- ARC, un prototype du ministère des Transports du Québec, Canada,
- PRESERVER et ROSE créés à l'initiative du ministère des Transports et des Communications de l'Ontario, Canada,
- PMEX développé par l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign aux Etats-Unis,
- PAMEX de l'Université de Maryland aux États-Unis,
- PAVEMENT EXPERT du Liverpool Polytechnic et de l'Université de Leeds en Grande Bretagne.

Mots-clés : systèmes experts, entretien, réseau routier, synthèse bibliographique.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION 2
   1.1 Motivations 2
   1.2 Les prototypes existants 3
   1.3 Plan du rapport 3
2. PRESENTATION SYNOPTIQUE 5
3. PROTOTYPES OPERATIONNELS 9
   3.1 SCEPTRE (Surface Condition Expert for Pavement Réhabilitation) 9
   3.2 ERASME (Entretien Routier Assisté par Système Multi Expert) 12
   3.3 ARC (Auscultation pour la Réfection des Chaussées) 14
4. SYSTEMES EN DEVELOPPEMENT 16
   4.1 OVERDRIVE (Overlay Design Heuristic Adviser) 16
   4.2 PRESERVER 18
   4.3 ROSE (Routing and Sealing) 20
   4.4 PMEX 23
   4.5 PAVEMENT EXPERT 25
   4.6 PAMEX (Expert System for Maintenance Management of Flexible Pavements) 27
5. PROTOTYPE CONCEPTUEL 30
   5.1 PARADIGM (Pavement Rehabilitation Analysis and Design Mentor) 30
6. CONCLUSION 31
7. BIBLIOGRAPHIE 33

1. INTRODUCTION

Cette recherche bibliographique a pour objectif l'identification des principaux systèmes experts, en Europe, aux États Unis et au Canada qui œuvrent dans le domaine de la gestion et de l'entretien du réseau routier. Elle cherche à mettre également en évidence les principales motivations qui sont rattachées à ces travaux. Elle ne prétend pas être exhaustive dans la mesure ou seules les réalisations qui ont fait l'objet de publications ont pu être analysées. Parmi la centaine d'articles qui ont été recueillis, une trentaine seulement se sont avérés pertinents et entraient dans le cadre prescrit.

1.1 Motivations

La principale de celles-ci est certainement d'ordre financier. Tout effort et tout gain de productivité dans ce domaine se traduit en terme d'économies importantes. L'exemple du réseau routier des États Unis est particulièrement frappant. Durant les quarante dernières années, l'investissement dans le réseau routier s'y est chiffré à plus de 1000 milliards de dollars. Les coûts annuels d'entretien se chiffraient quant à eux à 6 milliards de dollars en 1976, avec une augmentation prévue de 300 millions par année. En fait ces prévisions se sont avérées erronées car ces coûts s'élevaient déjà à 15 milliards en 1984. La "Federal Highway Agency" estime que les dépenses en entretien ont augmenté de 195% entre 1972 et 1985. Malgré cela, on estimait en 1984 que 42% du réseau était dans un état de détérioration avancé.

Dans le domaine de l'entretien du réseau routier, il ne saurait y avoir de gain de productivité significatif sans un bon diagnostic de l'état de la chaussée. Ce diagnostic repose sur les observations visuelles des déformations qui peuvent être complétées par des informations sur la capacité de la structure de la chaussée et de sa fondation.

La classification des signes extérieurs de dégradation requiert une très grande expérience et un jugement que seul un ingénieur hautement qualifié possède. L'utilité de ces données dépend d'abord et avant tout de leur exactitude. La rapidité à laquelle ces campagnes de relevés doivent être menées, fait qu'il est avantageux de donner à ces ingénieurs un outil intelligent qui les guide durant le processus d'identification.

Les informations de type structurel peuvent être extraites de la base de données du système de gestion des chaussées ou produites sur place au moyen d'instruments spécialisés comme le Dynaflect ou produites de façon différée à partir de mesures en laboratoire. L'intégration de ces éléments, parfois incomplets ou redondants et contradictoires, est délicate et souvent obtenue au moyen de procédés heuristiques qui reposent pour une grande part sur l'expérience et le jugement des ingénieurs spécialisés dans le domaine. La complexité, le manque de formalisme, les lacunes ou l'absence de théorie justificative, font qu'il est très difficile d'utiliser des outils informatiques traditionnels pour résoudre ces problèmes. Les systèmes experts offrent par contre la possibilité d'intégrer sous une forme déclarative et donc aisément manipulable ces connaissances peu structurées et en évolution constante.

Le choix de la stratégie de réhabilitation la plus appropriée susceptible d'apporter un remède aux dégradations constatées est une entreprise toute aussi délicate. Il faut tenir compte de critères de nature différente, physique comme la gravité, le type et la densité de ces dégradations ou économique (un traitement applicable à plus d'une déficience est préférable, une variété de traitements implique des coûts plus importants à cause de la

diversité des ressources impliquées). La conception de stratégies de réhabilitation est également conditionnée par les performances du revêtement qui sont influencées par:

- la conception,
- la construction,
- les matériaux,
- l'environnement,
- le trafic.

Plusieurs de ces influences peuvent être calculées, mais pour certaines il n'existe pas de méthodes algorithmiques. Les stratégies de choix sont bien souvent locales et propres à une agence ou à un groupe d'ingénieurs. La flexibilité d'un système expert s'avère être là aussi un avantage car elle permet d'intégrer ces deux types de connaissances:

- déterministes (généralement bien acceptées, bien gardées et diffusées) et
- heuristiques (davantage subjectives).

1.2 Les prototypes existants

Des moyens ont été envisagés pour gérer au mieux les sommes importantes consacrées à l'entretien du réseau routier. Au niveau informatique on a assisté à la mise en place de systèmes de gestion de chaussées ("Pavement Management Systems" ou PMS). Ces systèmes basés, entre autre, sur des techniques issues de la recherche opérationnelle, n'offraient cependant pas la possibilité de traiter certaines connaissances heuristiques et mal formalisées. Les systèmes experts se sont avérés un moyen pour remédier à cette lacune. Un certain nombres de prototypes sont maintenant disponibles aussi bien en Europe qu'en Amérique du Nord. Les systèmes qui ont été retenus dans cette étude comme étant les plus significatifs et les plus avancés dans ce domaine sont:

- SCEPTRE et
- OVERDRIVE qui ont tous deux été développés à l'institut de recherche sur les transports de l'université de Irvine en Californie, U.S.A,
- ERASME, un système créé par le Centre d'Études Techniques de l'Équipement Méditerranée en France,
- ARC un prototype du Ministère des Transports du Québec, Canada,
- PRESERVER et
- ROSE créés à l'initiative du Ministère des Transports et des Communications de l'Ontario, Canada,
- PMEX développé par l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign aux États Unis,
- PAMEX de l'Université du Maryland aux États Unis,
- PAVEMENT EXPERT du Liverpool Polytechnic et de l'Université de Leeds en Grande Bretagne.

Un dernier projet a été pris en considération car, bien que n'étant qu'à l'état de prototype conceptuel, il préfigure l'évolution probable des recherches dans ce domaine. Il s'agit de PARADIGM, un système multi-expert destiné à intégrer des systèmes experts existants (SCEPTRE et OVERDRIVE) ou à venir. ERASME, le système français en voie d'achèvement anticipe déjà cette tendance qui devrait se généraliser dans les années à venir.

1.3 Plan du rapport

Le rapport sur cette étude est divisé en cinq parties:

- La première est un tableau qui présente de manière synthétique les caractéristiques principales de chacun des systèmes étudiés.

- Ces systèmes sont ensuite présentés de manière plus complète dans une deuxième partie. Cet exposé plus détaillé résulte d'une synthèse d'articles publiés à propos de chacun d'eux. Dans la mesure du possible, on a cherché à obtenir une présentation aussi uniforme que possible mettant en évidence les buts, motivations et principaux aspects méthodologiques. Les systèmes ont été regroupés en trois catégories: les prototypes opérationnels, en développement ou à l'état de projet.
- La conclusion résume les différents aspects des systèmes étudiés ainsi que leurs limites. Elle précise quels sont les groupes de recherche les plus actifs dans le domaine et met en avant les axes de recherche futurs probables.
- La dernière partie est consacrée à une bibliographie où figurent, regroupés par projet, les articles qui ont fait l'objet d'un examen approfondi et qui ont permis cette synthèse.

2. PRESENTATION SYNOPTIQUE

	SCEPTRE	ERASME	ARC
ETAT	Prototype opérationnel	Prototype opérationnel	Prototype opérationnel
INTERFACE	Analyse des coûts, E/S Courbes de performance	Contrainte élastique Prévision orniérage Prévision fissures Résistance au gel Analyse des coûts	
CHAUSSEES	Souples	Souples Semi-rigides	Souples
IMPLANTATION	EXSYS Règles PC	SMECI, multi-expert Règles, Objets Arbre d'états Station SUN	EXSYS Règles Basic PC
RESULTATS	Recouvrement Scellement	Réhabilitation Majeure/Mineure	Causes des dégradations
ENTREES	Déficiences de surface	Déficiences de surface Sondages, Trafic Structure	Déficiences de surface Age, Déflexion Sondages
METHODE	Indices Courbes de performance	Multi-spécialistes Règles	Règles Questions
ANALYSE DES COUTS	Oui	Oui	Non
LIEU DE DEVELOPPEMENT	Institute of Transportation Studies, University of California	CETE Méditerranée France	Ministère des Transports, Québec
UTILISATEURS	Agences locales	Sociétés d'autoroutes Ecoles d'ingénieurs Réseau technique	Ministère des Transports Québec
RESEAU / PROJET	Projet	Projet	Projet

	OVERDRIVE	PRESERVER	ROSE
ETAT	En développement	En développement	En développement
INTERFACE		PMS existant	PMS existant Base de données sur la gestion des chaussées
CHAUSSEES	Souples	Souples	Souples
IMPLANTATION	EXSYS Règles MuLisp PC	OPS5 Règles PC	EXSYS Règles Fortran PC
RESULTATS	Épaisseur du revêtement Épaisseur du recouvrement Nécessité d'un recouvrement	Entretien routinier Scellement des fissures Rapiéçage	Pertinence de creusement et scellement des fissures Coûts
ENTREES	Sondages Revêtement	Déficiences de surface Matériaux utilisés	Déficiences de surface Age, Structure Trafic Entretien existant
METHODE	Analyse des composantes	Durée de vie Moindre coût	Indice de condition Interactif ou Automatique
ANALYSE DES COUTS	Non	Oui	Oui
LIEU DE DEVELOPPEMENT	Institute of Transportation Studies, University of California	Ministère des Transports et des Communications, Ontario	Ministère des Transports et des Communications, Ontario
UTILISATEURS	Agences d'états et locales	Agences d'états	Agences d'états
RESEAU / PROJET	Projet	Projet	Projet / Réseau

	PMEX	PAMEX	PAVEMENT EXPERT
ETAT	En développement	En développement	En développement
INTERFACE	Analyse des coûts, E/S Courbe de performance		E/S Graphique
CHAUSSEES	Béton	Souples	Béton
IMPLANTATION	INSIGHT 2+ Pascal	EXSYS Règles PC	SAVOIR Pascal PC
RESULTATS	Planification des stratégies de recouvrement Conception Prédiction des performances	Stratégies de réhabilitation (recouvrement, resurfaçage,...) ou d'entretien	Évaluation des déficiences Constitution d'une base de connaissances
ENTREES	Déficiences Nature des matériaux Drainage, Trafic Qualité de roulement	État de la structure performances fonctionnelles Qualité de roulement	Déficiences de surface
METHODE	Arbre de décision Durée de vie	Indice de condition Arbres de décision État du service	Méthode PCR Indices de condition
ANALYSE DES COUTS	Oui	Non	Non
LIEU DE DEVELOPPEMENT	University of Illinois	STATCOM Inc. University of Maryland	Liverpool Polytechnic University of Leeds
UTILISATEURS	Agences d'états	Agences locales	Agences locales
RESEAU / PROJET	Projet	Projet	Projet

	PARADIGM
ETAT	Prototype conceptuel
INTERFACE	Multi-expert OVERDRIVE SCEPTRE ...
CHAUSSEES	Souples
IMPLANTATION	PC
RESULTATS	Plan général de réhabilitation du réseau
ENTREES	Informations générées par OVERDRIVE et SCEPTRE
METHODE	Considérations administratives et politiques
ANALYSE DES COUTS	Oui
LIEU DE DEVELOPPEMENT	Institute of Transportation Studies, University of California
UTILISATEURS	Agences d'états
RESEAU / PROJET	Réseau

3. PROTOTYPES OPERATIONNELS

3.1 SCEPTRE (Surface Condition Expert for Pavement Réhabilitation)

Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, U.S.A

Buts du système

SCEPTRE se veut un outil d'assistance pour les ingénieurs spécialisés en revêtement. Il se veut aussi un outil d'enseignement pour les agences locales des villes ou comtés. Il a été développé dans le but de combler le manque d'ingénieurs qui ont les compétences suffisantes pour concevoir des stratégies de réhabilitation. En effet, ces ingénieurs se trouvent habituellement dans les grandes villes, dans les universités importantes ou les firmes privées. Or l'entretien de 75% du réseau routier américain est sous responsabilité locale.

SCEPTRE est un système qui assiste dans la planification et l'élaboration de stratégies économiquement viables de réhabilitation de chaussée. Ces stratégies de réhabilitation sont utilisées dans le but de restaurer une chaussée et de la remettre dans un état satisfaisant sans avoir recours à un effort de reconstruction.

Motivations

Les dépenses prévues des différentes agences américaines, pour la réparation et l'entretien des chaussés, s'élevaient à $9.4 milliards en 1986. Ce montant très élevé justifie que l'on se préoccupe de gérer au mieux ces ressources budgétaires.

La plupart des agences d'état développent des systèmes informatisés d'entretien de chaussée (PMS: "Pavement Management System"). Ces systèmes permettent d'identifier les endroits dans un réseau qui sont susceptibles d'être problématiques. Ils permettent aussi de proposer certaines stratégies d'entretien. Par contre, ils ne peuvent fournir le niveau de détail qui est nécessaire lorsqu'on entreprend l'étude d'une section de route à l'échelle du projet. A ce stade, l'évaluation de la condition de la surface de la chaussée joue un rôle essentiel. L'analyse détaillée et la bonne conception d'une stratégie de réhabilitation sont habituellement effectuées par un nombre limité d'ingénieurs spécialisés dans ce domaine. Ces ingénieurs utilisent leur expérience, leur jugement et les données disponibles pour élaborer une stratégie. La complexité et le manque de formalisme rendent très difficile l'utilisation des outils informatiques traditionnels pour résoudre ces problèmes.

Aspects méthodologiques

SCEPTRE est une des composantes de PARADIGM (voir plus loin). Ce système expert est conçu pour déduire des stratégies de réhabilitation d'une évaluation de la condition de la surface du revêtement.

Celle-ci est basée sur l'interprétation de résultats relatifs aux 3 indicateurs de performance suivants: qualité de roulement, sécurité et dégradations de surface. Toutefois, cette évaluation n'est pas toujours suffisante pour la conception (des précisions sur la structure

sont nécessaires). Par contre, l'évaluation de la condition de la surface d'une chaussée permet de porter un jugement sur la capacité qu'a cette chaussée à fournir le service actuel. Elle renseigne aussi sur les causes probables des défauts et la nécessité d'une évaluation de la structure.

L'indicateur de performance le plus important porte sur les dégradations de surface. On l'obtient par analyse visuelle du revêtement. Pour les chaussées souples on distingue:

- le faïençage à mailles fines (peau de crocodile),
- l'orniérage,
- la désintégration,
- la fissure longitudinale,
- la fissure transversale.

SCEPTRE considère 24 stratégies de réhabilitation qui sont des variations de 10 stratégies de base:

- ne rien faire,
- remplir les fissures,
- sceller par pulvérisation,
- "Friction course",
- "Chip seal",
- "Double chip seal",
- recouvrement par une fine couche d'asphalte (épaisseur <= 0.1 pied),
- recouvrement par une couche normale d'asphalte (épaisseur <= 0.25 pied),
- recouvrement par une épaisse couche d'asphalte (épaisseur >= 0.25 pied),
- fraiser et remplacer.

SCEPTRE a été développé avec EXSYS sur matériel Compaq. La base de connaissances qui implante la stratégie de choix comporte 140 règles (IF .. THEN ..) établies avec l'aide de deux spécialistes. Ces régles sont exploitées en chaînage arrière. Les éléments importants qui entrent dans le choix de cette stratégie sont:

- le type de dégradations,
- le nombre de dégradations,
- la sévérité des dégradations,
- la performance du revêtement (taux de détérioration),
- le trafic,
- le climat.

SCEPTRE fait appel à des programmes externes pour calculer les courbes de performance de chaque réhabilitation et maintenance; de même que pour afficher ou imprimer les résultats. Les courbes de performance mettent en relation l'âge du revêtement et un indice sur la condition générale du revêtement. Cet indice est fonction de la qualité de roulement et de la condition de la surface. Une chaussée sans aucun défaut mesurable a un indice de 100. Le minimum permis est 40. On utilise la durée de vie attendue (déterminée de façon subjective grâce à l'expérience des spécialistes) d'une réhabilitation pour construire sa courbe de performance. Une fois obtenues, ces courbes permettent de visualiser la détérioration de la chaussée et ce pour chaque réhabilitation. Elles servent ensuite à l'élaboration d'analyse des coûts. La performance est mesurée par la surface sous la courbe (au-dessus de 40). Plus cette surface est importante, meilleure est la performance. Les coûts associés à chaque étape sont ceux utilisés en 1986 par le WSDOT ("Washington State Department of transportation").

Une fois que l'on a obtenu une mesure de la performance et un coût pour chaque réhabilitation un indice de performance est calculé. Dans le cas de SCEPTRE, l'indice choisi est défini comme étant la surface (sous la courbe, au-dessus de 40) moyenne

annuelle divisée par le coût annuel d'un mille-voie. Cet indice permet, malgré sa nature approximative, une comparaison des coûts des différentes stratégies proposées. Plus l'indice est élevé, plus la stratégie est économiquement viable.

3.2 ERASME (Entretien Routier Assisté par Système Multi Expert)

Centre d'Étude Technique de l'Équipement, Méditerranée, France

Buts du système

ERASME est un système multi-expert pour les chaussées souples. Il est opérationnel depuis avril 89 pour les graves bitumineux. Il le sera en décembre 89 pour les graves hydrauliques. Son rôle est d'assister le gestionnaire lors du diagnostic d'une chaussée et de la conception des travaux pour une section homogène (mesure de déflexion, structure, nature, dates des travaux d'entretien, trafic). Il ne prend pas en compte les problèmes de niveau projet mais se situe comme complément d'un système de gestion technico-économique (PMS).

Motivations

Dans le domaine de l'entretien du réseau routier, en France, la prise de décision est très décentralisée. Il y a quelques centaines de décideurs pour quelques dizaines de spécialistes. Ces décideurs traitent des informations:

- quantitatives, comme les mesures en laboratoire,
- qualitatives, comme l'état de la surface, la description du drainage,
- incomplètes: il est rare de disposer de toutes les informations souhaitables,
- redondantes et parfois contradictoires.

Ils doivent aussi pallier aux lacunes de la théorie car certains aspects du problème restent encore peu connus et formalisés. On utilise souvent des règles de l'art issues de l'expérience ou de la pratique collective. Le processus de décision est inconscient et non rationnel.

Aspects méthodologiques

Source d'information sont:

- l'observation de la surface de la chaussée,
- les mesures faites en laboratoire.

Le problème de réhabilitation est divisé en plusieurs sous-problèmes, lesquels sont traités par autant de composantes spécialisées:

- Diagnostic des dégradations (inadéquation de la structure, fatigue de la surface,...).
- Proposition de tests discriminants (en laboratoire).
- Suggestion de stratégies de réhabilitation. Cette composante construit des programmes de travaux, énonce plusieurs alternatives pour un même diagnostic et ne se restreint pas à une seule solution. Elle qualifie chacune des solutions proposées en terme de coûts, durée de vie, niveaux de service à court terme. On peut en réduire le nombre en imposant des contraintes stratégiques, budgétaires ou environnementales. Elle permet de proposer des essais à effectuer lorsqu'il y a diagnostic conflictuel, et peut aussi prévoir l'évolution de la chaussée (en terme de coûts) si la solution proposée est repoussée.
- Prédiction de l'évolution de la chaussée.

Chaque fonction est réalisée par un système expert. Les items 1 et 3 sont implantés, 2 et 4 sont en étude. Chaque S.E. a sa propre base de connaissances, base de données et son arbre de décision, tous ont le même moteur d'inférence.

Chaque sous-problème est décomposé en différentes parties (e.g. les problèmes de gel sont indépendants des problèmes liés à la fatigue de la surface). Chaque S.E. est divisé en composantes spécialisées (une base de connaissances contenant règles, objets et méthodes). Chacune d'elles correspond habituellement à un ou deux experts humains. Elles communiquent par l'entremise d'un superviseur (chef de projet).

Le système effectue un certain nombre de calculs pour vérifier ou invalider les hypothèses courantes pendant le diagnostic ou pour calculer les paramètres d'une solution lors de la conception. Il dispose pour ce faire d'interfaces avec:

- ALIZE: pour le calcul de contraintes et les déplacements élastiques dans une chaussée,
- un modèle pour la prévision de l'ornière qui résulte du fluage de l'enrobé des couches supérieures de la chaussée,
- un modèle de prévision de la fissuration de surface par vieillissement du bitume,
- un logiciel pour l'évaluation de la résistance d'une chaussé au gel,
- un modèle pour le calcul des contraintes au droit d'une fissure,
- un modèle économique.

Quand certaines informations sont manquantes le système peut suggérer:

- de faire un certain nombre d'essais en laboratoire,
- d'attendre ou de choisir d'effectuer des travaux à l'opportunité incertaine.

Il peut aussi:

- énoncer plusieurs diagnostics,
- indiquer les essais ou les mesures qui permettraient de réduire le nombre de diagnostics concurrents,
- définir plusieurs solutions de travaux pour chacun des diagnostics,
- laisser à l'utilisateur la responsabilité de choisir une des alternatives.

ERASME a été développé sur station de travail 32 bits (Sun 360 / UNIX / X-Window) à l'aide du générateur de systèmes experts SMECI (ILOG) qui dispose d'une gestion d'objets, d'arbres d'états, de méthodes, de règles de production et de mécanismes de contrôle étendus.

3.3 ARC (Auscultation pour la Réfection des Chaussées)

Ministère des transports, Québec, Canada.

Buts du système

Le but de ce système est de conseiller la personne assignée à la cueillette des données sur les indications à relever, afin de pouvoir conclure sur l'état de la chaussée à un endroit donné. Il doit améliorer l'efficacité des enquêtes sur les dégradations superficielles des chaussées en agissant comme un questionnaire variable taillé sur mesure au contexte rencontré. Ce système original dans le sens où ses connaissances sont utilisées afin de choisir, pour un contexte de cueillette donné, les questions les plus pertinentes à poser.

Motivations

Les responsables (Directions régionales et District) veulent être conseillés quant aux tronçons qui doivent faire l'objet d'interventions prioritaires et quant aux types d'interventions à effectuer dans chaque cas. Plusieurs demandes proviennent du Service des projets dans le but d'évaluer, par le biais d'études structurales, la possibilité de conserver les structures de chaussées existantes lors de projets d'aménagement afin de réduire les coûts.
Pour évaluer l'état d'une chaussée, dans le passé, on relevait sur le terrain et sans discrimination le plus grand nombre de manifestations. L'analyse effectuée, une fois au bureau, pouvait laisser apparaître certaines lacunes: on constatait parfois que certaines données importantes n'avaient pas été relevées. Une cueillette assistée de manière intelligente permet de réduire ce risque.

Aspects méthodologiques

Le système interagit avec l'enquêteur et commence par prendre connaissance du contexte où l'enquête s'effectue afin d'énumérer une série de questions auxquelles l'enquêteur doit répondre.

Le contexte d'une enquête sur les dégradations de la surface d'une chaussée dépend de deux types d'information:

- connues préalablement et provenant de banques de données (e.g. comportement passé, la sollicitation par les charges etc.)
- d'autres qui sont les résultats des essais (profilométrie, déflexion etc.)

La cueillette s'effectue ensuite dans les conditions de ce contexte qui varie d'une section à une autre. La consultation interactive se déroule alors selon trois phases.

Le système pose préalablement un nombre restreint de questions sur:

- l'âge du revêtement,
- le trafic,
- l'état du drainage,
- la déflexion,
- la différence des mesures de profilométrie entre l'hiver et l'été qui permettent d'apprécier le comportement hivernal.

L'opérateur enregistre les réponses sous la forme d'un chiffre entre -5 et 5 (-5 négation non équivoque, +5 correspond à un affirmation non équivoque, 0 un manque d'information relativement à la question posée).

Le système exécute ensuite une procédure pour déterminer les questions relatives à l'état visuel de la chaussée susceptibles de contribuer le plus fortement à l'établissement du diagnostic. Ces questions sont par la suite suggérées. Dans les cas les plus évidents, une seule série de questions est suffisante pour permettre de conclure.

ARC supporte trois types de conclusions:

- les diagnostics exclus (certitude sous un certain seuil),
- le diagnostic le plus probable (certitude la plus élevée),
- les autres diagnostics possibles (certitude proche de celle du diagnostic le plus probable).

La base de connaissances contient et conserve les pratiques et directives développées au MTQ. Elle est organisée sous forme de règles de production. On distingue:

- les règles relatives aux informations a priori et
- les règles qui donnent les causes de dégradation en rapport avec des dégradations observées. Par exemple: si nid-de-poule ou rapiéçage alors défaut du béton bitumineux ou de sa mise en place.

Le moteur d'inférences, développé par Naylor, est écrit en Basic et ne dispose pas de mécanismes explicatifs. Il gère la propagation des probabilités.

4. SYSTEMES EN DEVELOPPEMENT

4.1 OVERDRIVE (Overlay Design Heuristic Adviser)

Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, USA.

Buts du système

Développement d'un prototype qui assiste des ingénieurs des agences locales dans la conception de l'épaisseur des recouvrements d'asphalte-béton.

Motivations

Le recouvrement par une couche relativement épaisse d'agrégats bitumineux posée sur le revêtement existant est devenu le principal traitement aux U.S.A. pour la réhabilitation des revêtements détérioré par un trafic modéré ou lourd. Un recouvrement peut améliorer la qualité de roulement d'une route qui a subi des distorsions. Il peut aussi augmenter la capacité structurale et la durée de vie du revêtement. La durée de vie typique d'un recouvrement asphalte-béton est de 10 ans, et souvent de 20 ans. S'il est correctement défini, il peut être une façon économiquement viable de corriger des dégradations de surface.

Aspects méthodologiques

OVERDRIVE est au même titre que SCEPTRE, une composante de PARADIGM (Pavement Réhabilitation Analysis and Design Mentor). SCEPTRE évalue les dégradations de surface au niveau d'un projet et recommande des stratégies de réhabilitation qui par la suite sont analysées plus en détail par OVERDRIVE. Ces deux systèmes ont été conçus de sorte que certaines entrées de SCEPTRE soient utilisées par OVERDRIVE.

Comme SCEPTRE, OVERDRIVE a été développé avec EXSYS sur matériel Compaq. Il dispose d'une interface avec un programme externe qui calcule les valeurs des paramètres de conception. Sa base de connaissances a été établie à partir d'une synthèse de la littérature et de l'expertise d'un ingénieur des revêtements. Elle comporte 100 règles. A l'aide de cette base de connaissances OVERDRIVE peut déterminer l'épaisseur effective du revêtement afin:

- d'estimer la nécessité d'un recouvrement et
- définir la nouvelle épaisseur d'asphalte-béton à utiliser.

L'épaisseur effective du revêtement est la somme des épaisseurs effectives de chaque couche (e.g. couche de surface, de base, de sous base). Sa valeur est donnée par le cumul de quantités formées du produit de l'épaisseur de chaque couche par un facteur de conversion approprié. Le calcul de ce facteur requiert l'estimation pour chaque structure:

- du type de matériau de chaque couche et
- de l'état de la couche.

Ce traitement nécessite l'expertise humaine. De l'asphalte-béton qui est en très bonne condition avec peu de fissures peut se voir attribuer un facteur de 0.9 à 1.0. De l'asphalte-béton démontrant d'importantes dégradations devrait recevoir un facteur entre 0.5 et 0.8,

les bases granulaires, un facteur de 0.2. L'utilisateur peut être assisté dans ce choix par la connaissance d'expériences passées dans la conception, la construction et si possible par des échantillons analysés en laboratoire. OVERDRIVE ne fournit pas d'assistance à ce niveau. Ce facteur est évalué pour chaque section. Celles-ci sont déterminées par l'utilisateur et devraient être homogènes.

La base de connaissances contient les règles nécessaires à l'analyse des différentes couches. OVERDRIVE peut reconnaître:

- 3 types de couche de surface,
- 8 types de couche de base,
- 5 types de couche de sous-base.

Le nombre d'états différents pour chaque couche varie entre 1 et 28 selon la couche et les matériaux.

La détermination de l'épaisseur de la nouvelle couche d'asphalte-béton à appliquer sur le revêtement existant implique le calcul de l'épaisseur d'un revêtement dit de pleine profondeur. Il s'agit de la couche d'asphalte-béton qu'il faudrait idéalement appliquer sur l'infrastructure pour assurer à la chaussée une durée de vie donnée. Pour le calcul de cette épaisseur, OVERDRIVE suppose que l'infrastructure a une profondeur infinie et que toutes les couches sont infinies horizontalement. Il considère les propriétés des matériaux, les conditions extérieures (température, effet du gel, etc) ainsi que l'importance du trafic. L'échantillonnage des matériaux de l'infrastructure est encouragé et dans le cas où cette information n'est pas disponible, OVERDRIVE permet une caractérisation plus subjective de l'infrastructure. L'estimation de l'importance du trafic est réalisée à partir d'un coefficient qui mesure le nombre de charges de 18000 livres supportées par chaque axe pendant la durée de vie de la chaussée (18 KEAL). Pour déterminer ce coefficient il existe plusieurs méthodes selon la disponibilité d'informations sur le trafic. Dans le cas où ces données ne sont pas disponibles, OVERDRIVE interroge l'utilisateur pour déterminer une classe de trafic. Des tables de trafic sont mises à la disposition de l'utilisateur pour lui permettre de déterminer une valeur approximative du 18 KEAL. OVERDRIVE peut fournir, si désiré, les facteurs de croissance du trafic pour une période donnée. Dès que les paramètres relatifs à l'infrastructure et au trafic sont établis, OVERDRIVE calcule l'épaisseur du revêtement de pleine profondeur en appelant un programme externe qui fait appel à une table de conception.

La nécessité d'un recouvrement sur les couches existantes est déterminée par la comparaison entre l'épaisseur du revêtement pleine profondeur et l'épaisseur effective.

Si l'épaisseur pleine profondeur est inférieure à l'épaisseur effective alors la structure est adéquate pour le service attendu. OVERDRIVE informe alors l'utilisateur qu'un recouvrement n'est pas nécessaire. Si certaines dégradations de surface viennent compromettre la qualité du roulement ou la sécurité, OVERDRIVE fournit à l'utilisateur des conseils qualitatifs quant à la pertinence d'un recouvrement sur une telle chaussée.

Si l'épaisseur pleine profondeur est supérieure à l'épaisseur effective, OVERDRIVE calcule l'épaisseur du recouvrement par la différence entre l'épaisseur pleine profondeur et l'épaisseur effective.

L'utilisateur a la possibilité de modifier les entrées sans qu'il soit nécessaire de tout réintroduire et de relancer OVERDRIVE. Ceci lui permet d'étudier plusieurs stratégies.

4.2 PRESERVER

Ministère des Transports et des Communications, Ontario, Canada

Buts du système

Le but du système est de suggérer un ensemble de traitements pour remédier aux dégradations de la chaussée. Les traitements envisagés peuvent être:

- le scellement des fissures,
- le rapiéçage,
- ou autres.

dans le but de corriger les dégradations de surface et retarder le processus de dégradation.

Motivations

La principale motivation est la préservation de l'investissement. Les traitements peuvent se combiner et comme les connaissances du domaine sont heuristiques elles sont plus facilement représentables à l'aide d'un système expert. Il faut, en effet, tenir compte de critères de nature différente comme:

- la sévérité de la dégradation,
- la densité de la dégradation,
- un traitement applicable à plus d'une déficience est préférable,
- une variété de traitements implique des coûts plus importants à cause de la diversité des ressources impliquées.

Les stratégies de choix étant bien souvent locales, la flexibilité d'un système expert s'avère être un avantage.

Aspects méthodologiques

Le système entreprend les démarches suivantes:

- il demande les informations relatives à la section étudiée, ainsi que les dégradations observées,
- il génère ensuite un ensemble de traitements réalisables pour chaque dégradation,
- si une dégradation a une nature diversifiée, il sélectionne un ensemble de traitements parmi l'ensemble d'origine,
- enfin il calcule le coût annuel de chaque traitement. Lors de cette étape, l'usager doit fournir certaines informations complémentaires.

La génération des ensembles de traitements est basée sur les informations relatives à la section, le type de dégradation, sa sévérité et sa densité. Le déclenchement d'une règle provoque la considération d'un ou plusieurs traitements. Chaqu'un d'eux a une durée de vie qui est considérée lors de l'analyse des coûts. Plutôt que d'éliminer des traitements lorsque leur durée de vie est plus longue que la période avant réhabilitation, on les considère et le coût annuel correspondant est calculé en fonction du nombre d'années durant lesquelles ils seront en service.

Pour chaque dégradation, un ensemble de traitements est généré. Il peut y avoir chevauchement complet ou partiel des traitements suggérés. Pour une section présentant

une surface déformée modérément et contenant quelques régions avec faïençage à mailles fines (peau de crocodile) sévères, on suggère par exemple:
Pour la distorsion:
- le rapiéçage à froid ou
- le rapiéçage à chaud.

Pour le faïençage:
- le rapiéçage à froid,
- le rapiéçage à chaud ou
- l'excavation, la pose de granulaire et le rapiéçage à chaud.

Le traitement peut donc être choisi parmi les éléments de l'intersection. Par contre, si l'intersection est vide, il peut être choisi à partir de l'ensemble correspondant à la dégradation la plus sévère. Ces stratégies sont implantées avec des règles ce qui s'avère être une solution plus puissante qu'une solution de type procédural.

Un ensemble de règles permettant des calculs de coûts à été incorporé. Il correspond aux directives employées au MTC. Ces directives sont basées sur des associations empiriques provenant d'entrevues de plusieurs experts et qui peuvent être représentées facilement sous forme de règles (une approche similaire a été utilisée dans le cas de ROSE). Elles permettent le choix du meilleur traitement. Dans certains cas, l'utilisateur doit fournir des données au système en ce qui concerne les quantités de matériaux à utiliser pour appliquer un traitement donné (un système plus complet irait consulter une base de coûts associés aux activités). Le meilleur traitement est choisi en fonction du moindre coût annuel équivalent. Le système peut être facilement adapté pour donner la liste des traitements retenus en fonction de leurs coûts respectifs.

PRESERVER a été développé avec OPS5. Il comporte 50 règles qui traitent les dégradations suivantes:
- faïençage à mailles fines (peau de crocodile),
- fissure en rive,
- distorsion (déformation dû au gel).

Une implantation complète nécessiterait l'ajout de 40 règles. De 10 à 20 nouvelles règles pour l'analyse des coûts, des règles pour régir les groupes de trois ou quatre ensembles de traitements et des règles pour vérifier la nature pratique des stratégies suggérées. Celles utilisées jusqu'à maintenant ont fourni un système de base qui pourra évoluer vers un système plus complet. PRESERVER serait plus efficace s'il avait accès à la base de données du système de gestion des chaussées. Les informations relatives aux dégradations et aux plans de réhabilitation pourraient être utilisés lors de l'élaboration des plans d'entretien. Une intégration horizontale avec la planification de réhabilitation ainsi qu'une intégration verticale avec la cueillette d'informations relatives aux dégradations serait souhaitable.

4.3 ROSE (Routing and Sealing)

Ministère des Transports et des Communications, Ontario, Canada

Buts du système

Ce système aide à la mise en œuvre de la technique du creusement et scellement ("routing and sealing") (C&S) de fissures comme stratégie de réhabilitation de chaussée béton-asphalte dans les régions froides. Il fait partie d'un ensemble de systèmes experts qui aident au choix et à la recommandation de traitements de préservation du revêtement. La technique C&S a été choisie pour illustrer comment les systèmes experts peuvent améliorer le choix et la planification d'une stratégie de réhabilitation.

Ce système a été développé pour satisfaire les exigences suivantes:

- capturer et coder l'expertise,
- appliquer de façon consistante la technique du C&S,
- apporter une aide pour la préparation de plans de préservation pour des sections de chaussée,
- aider les décisions prises au niveau du réseau,
- assister les ingénieurs dans le choix des sections pour lesquelles le C&S est le plus profitable,
- utiliser de façon efficace les informations disponibles sur des sections de chaussée. Ceci permet de choisir rapidement et efficacement un traitement approprié pour les sections de l'ensemble du réseau, ce qui rend possible:
    - l'analyse des besoins en terme budgétaire,
    - l'optimisation du choix et de la séquence des traitements à effectuer sur l'ensemble du réseau en considérant tous les traitements possibles suggérés à une échelle plus locale (section).

Motivations

La technique du creusement et scellement des fissures est utilisée à titre préventif. Elle a pour but de prévenir l'infiltration de l'eau de surface (en particulier, celle qui contient les sels utilisés en hiver) dans la structure de la chaussée. On procède à une ouverture de la fissure d'une largeur de 20 à 40 mm et d'une profondeur de 10 mm pour favoriser une meilleure pénétration du scellant . On verse ensuite à chaud un composé polymères asphalte-ciment. Si cette opération est exécutée convenablement et à temps, elle peut prolonger de 30% la durée de vie du revêtement.

Compte tenu que le montant moyen annuel consacré au C&S est de $1,5 millions, que le coût moyen pour une route à deux voies est de $1000 par km et que le coût moyen d'un resurfaçage est de $40000 par km, afin de réaliser des économies importantes, il faut:

- choisir judicieusement les sections à traiter,
- effectuer le traitement à temps et correctement.

Ce choix économiquement important repose sur certains critères qui peuvent facilement s'implanter dans le cadre d'un système expert.

Aspects méthodologiques

Il n'est pas toujours judicieux d'utiliser un traitement de type C&S. En particulier, il n'est pas toujours souhaitable de traiter de trop fines fissures. S'il y a trop peu de fissures candidates, il se peut que le C&S ne soit pas économiquement viable. Si la fissuration est trop importante, il est peut-être préférable de resurfacer.

En plus du nombre et de la quantités de fissures, le choix d'une opération de C&S dépend aussi du type de fissures: il est souvent plus important de faire subir un C&S aux fissures transversales car elles affectent la qualité de roulement, et on pense que le C&S peut prévenir leur développement. Par contre et de manière générale, les fissures en rive de même que les fissures en peau de crocodile ne devraient pas subir un C&S. La qualité du service, la présence de dégradations telles que désintégration ou l'orniérage, l'existence de traitements d'entretien peuvent aussi intervenir dans la décision d'opérer un C&S. Notamment, les chaussées qui ont une qualité de service plutôt basse (détériorée) ne devraient pas subir de C&S. La qualité de service est mesurée grâce à l'indice PCI ("Pavement Condition Index") qui évolue sur une échelle de 0 à 100. Les chaussées neuves ont un PCI de 95. La réhabilitation est effectuée lorsque cet indice se trouve entre 40 et 60.

Ces directives générales d'emploi de traitements de type C&S ont été élaborées au niveau macro par:

- une étude de la littérature,
- un examen des performances des expériences de C&S,
- des consultations avec des ingénieurs du ministère des transports de l'Ontario.

Elles ont permis la mise en place de la base de connaissances d'un prototype.

A un niveau plus fin, il s'agit de détailler l'influence de toutes les variables qui conditionnent le C&S.

Une caractéristique importante de ROSE réside dans l'existence d'une méthode qui permet l'évaluation des dégradations de surface. ROSE tient compte de l'influence des 15 types de dégradation notées selon cinq niveaux de sévérité et de densité (375 états différents).

ROSE est aussi influencée par d'autres variables dont les valeurs sont extraites du système de gestion des chaussées:

- le "pavement condition index" (PCI),
- l'age,
- le mode actuel d'entretien,
- la longueur de la section,
- l'épaisseur total de AC,
- la nature de la base,
- l'état du AC avant recouvrement.

Le nombre total de variables considérées est de 41 dont 39 ont des valeurs numériques. Une des tâches de ROSE consiste donc à convertir toutes ces variable en une seule: un traitement de type C&S est-il désirable? La conversion est réalisée par un ensemble de 360 règles.

ROSE est capable de fournir des décisions à deux niveaux. Au niveau du projet elle est basée sur des informations détaillées relatives à une section donnée, au niveau du réseau elle est basée sur une synthèse d'informations.

ROSE fonctionne selon deux modes:

- interactif: où l'on interroge l'utilisateur et on traite une section à la fois,
- automatique: où il y a interaction avec d'autres programmes et où l'on traite plusieurs sections à la fois.

Le mode interactif a été développé en premier à l'aide d'EXSYS sur IBM-PC. La réponse quant à la pertinence du C&S est donnée sous forme numérique sur un échelle de 1 à 10 (0: rejet, 5: peut-être, 10: hautement recommandé). Ce mode ne comporte pas d'interface avec la base de donnée implantée sur ordinateur central.

Le mode automatique traite rapidement plusieurs sections et permet l'accès à la base de données ainsi que l'analyse statistique, avec le logiciel SAS, des recommandations C&S.

ROSE a été testé et calibré, en utilisant la version interactive sur 100 sections. Comme ROSE a été construit de manière à utiliser toutes les informations disponibles sur l'état de la surface sans aucune forme de simplification, il serait possible de réduire le nombre de règles en:

- donnant des descriptions plus globales des dégradations de surface.
- demandant à l'utilisateur des questions plus générales.

En mode automatique la pertinence de C&S a été évaluée dans 2 régions: 488 sections (nord) et 396 (sud), en tout 7200 km.

4.4 PMEX

University of Illinois, Urbana-Champaign, U.S.A

Buts du système

Le but du système est d'assister les ingénieurs lors de l'évaluation des chaussées d'autoroute en béton.

On considère trois types de chaussées:
- béton à joints renforcés ("jointed reinforced concrete": JRCP),
- béton uni à joints ("jointed plain concrete": JPCP),
- béton à renforcement continu ("continuously reinforced concrete" CRCP).

Le système permet d'identifier les types de dégradations et de déterminer les causes. Il choisit des techniques de réhabilitation et les combine pour générer des stratégies d'entretien. Il opère au niveau projet.

Motivations

La conception de stratégies de réhabilitation est conditionnée par les performances du revêtement qui sont influencées par:
- la conception,
- la construction,
- les matériaux,
- l'environnement,
- le trafic.

Plusieurs de ces influences peuvent être calculées, mais pour certaines il n'existe pas de méthodes algorithmiques. La solution systèmes experts a donc été choisie car elle permet d'intégrer ces deux types de connaissances:
- déterministes (généralement bien acceptées, bien gardées et diffusées) et
- heuristiques (connaissance subjective, propre à une agence ou à un groupe d'ingénieurs).

Aspects méthodologiques

Le système simule une conversation entre un ingénieur et un expert en revêtement et procède selon les étapes suivantes:
- cueillette de données au niveau du projet,
- évaluation des conditions du projet,
- évaluation de l'état actuel,
- prédiction de l'état s'il n'y a pas réhabilitation,
- essais physiques (si nécessaire),
- choix de la technique de réhabilitation
- développement de la stratégie de réhabilitation,
- prédiction des performances de la stratégie retenue,
- analyse des coûts des différentes alternatives,
- choix de la meilleure stratégie.

L'évaluation du revêtement est une activité de diagnostic pour laquelle il a été décidé de construire des arbres de décision propre à chaque type de problèmes que peut avoir le revêtement (adéquation structurale, etc.). Les branches de l'arbre mènent à une ou plusieurs phrases expliquant les dégradations qui existent et les facteurs considérés pour leur identification.

Des modèles sont employés pour prévoir l'état futur du revêtement s'il n'y a pas réhabilitation. Le système utilise ces valeurs projetées pour réévaluer le revêtement chaque année (projection pour 20 ans). Ceci permet d'isoler les années durant lesquelles certaines dégradations vont faire leur apparition. On dispose d'un système d'évaluation pour chaque type de chaussée.

La réhabilitation est une activité de conception qui permet de satisfaire les besoins en réparations ou améliorations identifiés par l'évaluation. Dans ce processus, il existe un grand nombre de façon de combiner plusieurs techniques de réhabilitations. Des heuristiques sont utilisées pour marier ces techniques pour obtenir des stratégies sujettes à diverses contraintes de compatibilité. On utilise certains modèles permettant de prévoir les performances et le coût d'une stratégie donnée. L'utilisateur peut alors faire un choix. Là aussi on dispose d'un système de réhabilitation pour chaque type de chaussée.

Un prototype a été développé à l'aide d'INSIGHT 2+. Chaque alternative dans les arbres de décision a été codée sous forme de règles. Le système final est écrit en Pascal avec comme conséquence une perte de transparence des connaissances, mais aussi une plus grande facilité d'interfaçage avec les procédures d'entrée-sortie, de calcul de performance de la chaussée et une augmentation des performances.

4.5 PAVEMENT EXPERT

Liverpool Polytechnic, University of Leeds, United Kingdom

But du système

Ce système est conçu pour les chaussées de béton. Ses objectifs sont de permettre à un utilisateur de faire l'évaluation (et non le diagnostic) d'un coefficient d'état de la chaussée ("Pavement Condition Rating" ou PCR) et d'un indice de déformations structurelles ("Structural Damage Index" ou SDI) avec un maximum de précision, de sécurité et d'uniformité.

Motivations

Tous les PMS sont basés sur des évaluations quantitatives de la chaussée ou utilisent des paramètres qualitatifs tels que les relevés visuels des défauts de la chaussée. La classification des signes extérieurs de dégradation requiert une très grande expérience et un jugement que seul un ingénieur hautement qualifié possède. L'utilité de ces données dépend d'abord et avant tout de leur exactitude. Les jeunes ingénieurs qui possèdent peu d'expérience dans l'évaluation des chaussées considèrent que l'identification des signes de dégradation et leurs causes est une tâche ardue. A cause de la rapidité à laquelle ces campagnes de relevés doivent être menées, il est avantageux de donner à ces ingénieurs un outil intelligent qui les guide durant le processus d'identification.

Aspects méthodologiques

La base de connaissances utilise la documentation sur le PCR et a été élaborée à l'aide d'experts du domaine. Elle contient des informations sur la méthode de calcul du PCR, sur les types de déficiences ainsi que des règles et restrictions concernant le PCR. Elle a été implantée à l'aide du générateur SAVOIR sur un matériel de type PC sous système MSDOS.

L'évaluation est faite par un observateur expérimenté placé à bord d'un véhicule. Il interagit avec le système pour obtenir de l'aide, des clarifications et des rapports. Il reconnait et quantifie les signes de déficiences que le système enregistre de manière intelligente. Le système permet en outre d'estimer la longueur d'une section et d'évaluer certaines de ces déficiences. Cette procédure comporte cinq stades.

Le préambule permet à l'utilisateur de se familiariser avec "Pavement Expert" et d'entrer certaines informations générales sur la route à analyser: nom, comté, type de revêtement...

L'inspection préliminaire est réalisée lors d'un parcours complet de la route à 60 km/h durant lequel l'utilisateur est invité à donner son opinion sur l'état de la chaussée (qualité de roulement) basée sur une échelle de 1 à 5, la présence de renflement, de fissures et points de repère. Le système enregistre ces informations relativement au chaînage. En tout temps, lors d'un arrêt du véhicule, l'utilisateur peut visualiser des relevés, obtenir une description des déficiences observées, interrompre l'inspection, recommencer l'inspection.

L'évaluation préliminaire permet d'identifier des sections de route dont l'état est homogène et qui ont une longueur maximum de 5 km. Ces sections sont délimitées par le système en

fonctions des règles régissant le PCR. Une justification du choix des sections peut être demandée par l'utilisateur qui a la possibilité de modifier les sections déterminées par le système.

L'inspection détaillée à pour but d'inspecter plus précisément chaque section afin de déterminer le PCR. Chaque section est parcourue à 20 km/h. L'utilisateur enregistre de manière contrôlée les défauts observés. Le système reconnait douze types de déficiences avec trois niveaux de sévérité et trois niveaux d'étendue. Les déficiences principales sont:

- le rapiéçage,
- le renflement,
- l'effritement des joints,
- et divers types de fissures.

Le système peut demander à l'utilisateur d'aller inspecter de plus près une déficience (son étendue, sa sévérité etc).

Lors de l'épilogue, les PCR et SDI sont calculés et affichés pour chaque section. L'utilisateur peut demander un rapport complet sur la route inspectée. Ce rapport présente:

- l'identification de la route,
- le chaînage,
- un résumé de l'inspection préliminaire,
- le nombre de sections considérées lors de l'inspection détaillée,
- la description complète de chaque section.

4.6 PAMEX (Expert System for Maintenance Management of Flexible Pavements)

STATCOM Inc, University of Maryland,USA

But du système

Des indicateurs qui combinent des informations sur la qualité de conduite, la qualité de la structure, les performances fonctionnelles, ont été utilisés pour développer un arbre de décision qui permet d'évaluer les performances de la chaussée, identifier les dégradations et leurs causes probables et finalement, de proposer les mesures appropriées dans le but de corriger ces problèmes.

Aspects méthodologiques

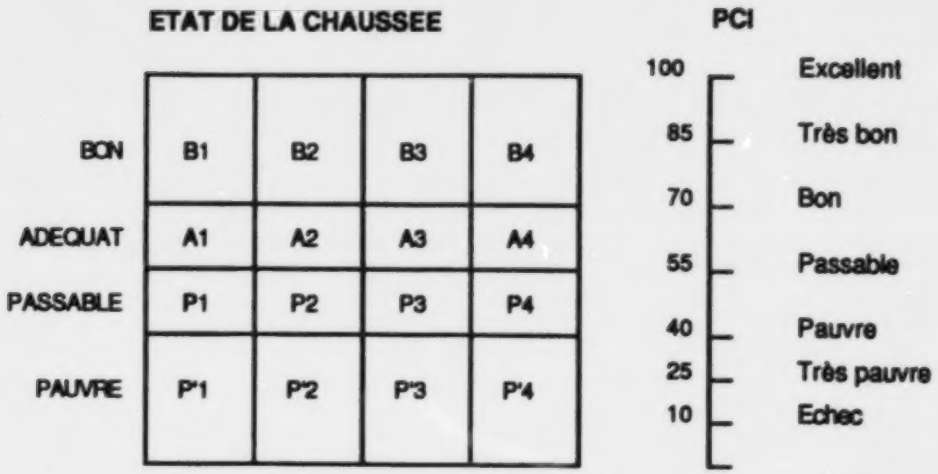
Le choix des indicateurs de condition repose sur deux facteurs:
- une utilisation généralisée et bien acceptée des autorités dans la matière et
- la simplicité de détermination.

Les principaux indicateurs retenus sont:
- l'indice de service actuel ("present serviceability index" :PSI),
- l'indice d'état de la chaussée ("pavement condition index": PCI) et
- la résistance au dérapage ("skid resistance").

D'autres sont utilisés comme:
- le niveau de dégradation ("damage level": DL) qui représente le pourcentage d'usure de la chaussée à un instant donné et
- la durée de vie résiduelle ("remaining life": RL).

L'accumulation de charges lourdes supportées par la structure provoque la détérioration du PSI. Lorsque l'indicateur atteint un certain minimum (noté PF), il y a échec. Ce minimum est plutôt subjectif et dépend de l'importance de la voie de transport et de son utilisation. Une fois PF connu on peut estimer le facteur NF (nombre de répétitions de charges qui cause PF). Ce facteur s'exprime en fonction du nombre de charges sur une seule voie: ESAL (Equivalent Single Axle Load). DL(t) est alors défini comme étant NT/NF et RL (Remaining Life) comme étant 100% - DL(t). On dérive ensuite l'indicateur général de performance: GPI ("General Performance Indicator"), défini comme fonction de PCI pour un intervalle donné de PSI et de la détérioration (DL) de la section considérée. Ce paramètre donne une idée de la courbe de détérioration de la chaussée. GPI est aussi utilisé, en conjonction avec PSI, dans les principaux nœuds de l'arbre de décision. On réussit à avoir un éventail de 16 régions basées sur une division de PCI et sur une division en quatre intervalles de DL. L'indicateur de cause de dégradation: DCI ("Deterioration Cause Indicator"), permet, pour terminer, de mieux cerner la cause de la détérioration de la chaussée. Celle-ci est fonction de la structure de la chaussée, du climat, de la qualité de la construction ou une combinaison de ces trois facteurs.

L'indicateur DCI est utilisé dans un programme spécial de maintenance et de réhabilitation lorsqu'un de ces facteurs est la cause de la détérioration.



État de la chaussée vs PCI

D'autres paramètres sont utilisés lorsque les principaux ne réussissent pas à déterminer les causes de détérioration ou n'arrivent pas à dériver des solutions:

- l'indicateur de fissuration:CI ("Cracking Indicator"),
- l'indicateur de déformation:DI ("Deformation Indicator") et
- l'indicateur de non pavage:NPI ("Non-pavement Indicator").

Une fois la condition de la chaussée établie, le système génère une série d'alternatives pour la maintenance et/ou la réhabilitation. Il y a 30 actions possibles et les différentes combinaisons font que l'on peut avoir jusqu'à 160 alternatives. On distingue deux types de stratégies:

- la maintenance de routine (réparations locales) et
- la réhabilitation majeure (traitement de la surface, recouvrement, recyclage de la surface, recyclage de la structure et reconstruction).

L'aboutissement à une des stratégies se fait, dans un premier temps, à l'aide de PSI dont les valeurs permettent de diviser l'espace de recherche en trois branches:

- PSI > 2.8: bonne condition, aucune maintenance ou réhabilitation majeure n'est nécessaire (pour autant que la surface soit sure).
- PSI de 2.8 à 2.2: condition acceptable, aucune maintenance ou réhabilitation majeure n'est nécessaire mais pourrait être avantageuse.
- PSI < 2.2: mauvaise condition, maintenance ou réhabilitation majeure rendue nécessaire.

L'indice GPI de même que les autres paramètres sont ensuite utilisés pour choisir une solution particulière.

L'implantation est réalisée à l'aide d'EXSYS sur micro ordinateur. La base de connaissances comporte 300 règles. On a opté pour une approche algorithmique pour le calcul des paramètres. La validation a été effectuée par des experts et des utilisateurs de la FHWA (Federal Highway Agency). Ces derniers ont apporté un grand nombre de modifications à la base de connaissances.

Lors de l'évaluation à l'aide de cas réels du système, on s'attend à une amélioration de la base de connaissances, à l'évaluation de la solidité de l'approche décisionnelle utilisée

et au développement de nouvelles heuristiques (sélection des stratégies de réhabilitation et de maintenance).

5. PROTOTYPE CONCEPTUEL

5.1 PARADIGM (Pavement Rehabilitation Analysis and Design Mentor)

Institute of Transportation Studies, University of California, U.S.A

Il s'agit d'un système qui regroupera au moins quatre systèmes expe[illegible].

SCEPTRE permet d'identifier des stratégies économiquement viables de maintenance et de réhabilitation de la chaussée et se base sur l'état de surface de la chaussée.

OVERDRIVE fournit de façon interactive des conseils et des lignes de conduite relatives aux stratégies de réhabilitation impliquant un recouvrement d'asphalte ou de béton.

Deux autres systèmes doivent être ajoutés à cet ensemble. Ces derniers permettront d'obtenir un plan de réhabilitation, au niveau du réseau, à partir des informations de niveau projet générées par SCEPTRE et OVERDRIVE. Ce plan sera assujetti aux contraintes budgétaires liées à la construction. Il s'agira en fait de pré et post processeurs qui détermineront les stratégies de réhabilitation les plus économiquement viables. Ils se baseront sur des critères de nature économique, politique, administrative ou géographique. Ces pré et post processeurs donneront des conseils experts et fourniront un environnement plus convivial qui permettra aux utilisateurs moins familiers avec les techniques d'optimisation, de mieux formuler les problèmes et de bien interpréter les résultats.

6. CONCLUSION

Les réalisations présentées dans ce rapport témoignent de la possibilité de développer un système expert dans le domaine de l'entretien du réseau routier. Elles traduisent le souci de formaliser les connaissances souvent pragmatiques et heuristiques du domaine. Elles permettent la mise à jour de l'expertise d'une manière conviviale. Les mécanismes de trace du raisonnement (le pourquoi et le comment) font que ces réalisations sont aussi d'excellents outils didactiques.

La plupart de ces systèmes experts s'intéressent à un champ d'application particulier et limité. Il s'agit principalement d'aider à la conception de travaux de réhabilitation qui se situent au niveau du projet: rapiéçage, scellement de fissures, recouvrement, resurfaçage... Quelques systèmes intègrent la notion de coût et parmi ceux-ci, certains (PRESERVER et ROSE) sont ou devraient être interfacés à un système de gestion des chaussées qui traite le niveau plus global du réseau. Ils peuvent ainsi quantifier les conséquences de l'application des politiques d'entretien. Deux projets (ERASME et PARADIGM) sont plus avancés que les autres car ils intègrent plusieurs systèmes experts et offrent par ce moyen une couverture plus globale du domaine. Il parait fortement probable que l'on assiste donc, dans les années à venir, à une évolution qui devrait confirmer les tendances déjà présentes dans certaines réalisations encore partielles. La multiplication des systèmes spécialisés devrait susciter le besoin d'une intégration dans un environnement uniformisé d'une part, et d'autre part, les systèmes de gestion des chaussées (PMS) devraient pouvoir être associés d'une façon plus intime (aussi bien au niveau des entrées que des résultats) à ces systèmes experts spécialisés. Dans cet ordre d'idées, il appert au vu des documents analysés, que certaines équipes sont plus avancées que d'autres. Il s'agit de:

- l'Institut d'Études sur les Transports ("Institute of Transportation Studies") de l'Université de Californie à Irvine aux États Unis, qui a mis au point les systèmes SCEPTRE et OVERDRIVE et qui travaille à leur intégration au sein de PARADIGM,
- le Ministère des Transports et des Communication de l'Ontario au Canada responsable du développement de PRESERVER et ROSE,
- du CETE Méditerranée en France auteur du système multi-expert ERASME.

Au Québec, il n'existe qu'une réalisation opérationelle: ARC, développée au Ministère des Transports. Elle présente la particularité d'offrir une aide à la cueillette des données. Bien que cette spécificité ne se retrouve dans aucun des autres projets analysés, elle correspond néanmoins une préoccupation importance: toute bonne analyse ne peut, en effet, être effectuée qu'à partir d'un ensemble de données consistant et exhaustif. Cet aspect devrait lui aussi donner lieu à l'avenir à la conception de nouveaux systèmes experts. Un autre projet québécois en cours de réalisation témoigne d'ailleurs de ce souci. Il associe une équipe du Ministère des Transports formée de M. Pehlivanidis et G. Larose et une équipe du Centre de Recherche sur les Transports de l'Université de Montréal (B . Lefebvre, M. Gendreau et D. Ferrero). Ce projet de système à base de connaissances vise à mieux exploiter les données fournies par un appareil: le Dynaflect, dans le but d'obtenir une meilleure connaissance de la structure de la chaussée. Cet axe de recherche original devrait être poursuivi au Québec et donner lieu à la création d'un ensemble d'outils spécialisés dans ce domaine. A terme on peut envisager une intégration de ces derniers à d'autres systèmes traitant en amont les données ainsi recueillies. Ceux-ci pourraient s'inspirer de réalisations existantes ou à venir, développées par les équipes canadienne, française ou américaine déjà citées.

Certaines actions pourraient être entreprises dans le but de favoriser la recherche et le développement de systèmes experts dans le domaine de la gestion et de l'entretien du réseau routier au Québec. Leur but principal serait de permettre une meilleure connaissance critique des produits existants, ce qu'une simple étude bibliographique ne saurait atteindre. Cette évaluation pour être complète et exhaustive se doit d'être entreprise par des spécialistes de l'entretien ayant de préférence une expérience pratique au niveau de la conception ou de l'utilisation de systèmes experts. Elle devrait comporter deux volets.

Une rencontre avec l'équipe responsable de la conception du prototype dans le cadre d'une visite sur les lieux du développement ou à défaut par le biais d'une invitation à une manifestation scientifique (séminaire ou colloque) d'un des responsables du projet, permettrait de mieux percevoir certains aspects. Il serait utile à ce niveau de recueillir des informations complémentaires sur les motivations initiales, les difficultés rencontrées, la qualité des outils matériel et logiciel utilisés, les perspectives de recherches relatives à l'extension et l'amélioration des produits existants et au développement de nouveaux systèmes.

Dans le cas où les prototypes sont réellement utilisés, il serait particulièrement indiqué d'obtenir une appréciation de la part des utilisateurs sur la qualité des services rendus par le produit, ses avantages, ses défauts, ses lacunes, ses impacts négatifs ou positifs au niveau des ressources humaines concernées par ces réalisations.

Les actions entreprises dans ce cadre devraient permettre la mise en place au Québec d'une politique originale de développement de systèmes experts pour l'entretien et de la gestion du réseau routier. Cette politique, s'appuyant sur une évaluation critique des réalisations existantes, devrait permettre à la province de se doter d'un système de gestion des chaussées intégrant, comme dans les réalisations les plus en pointe, des composantes intelligentes réalisées sous forme de modules experts.

7. BIBLIOGRAPHIE

SCEPTRE

Surface condition expert system for pavement rehabilitation planning
RITCHIE Stephen G., YEH Che-I, MAHONEY Joe P., JACKSON Newton C.
Journal of transportation engineering, Vol 113 No 2, 1987

Development of an expert system for pavement rehabilitation decision-making
RITCHIE Stephen G., YEH Che-I, MAHONEY Joe P., JACKSON Newton C.
Institute of transportation studies, University of California, Irvine, U.S.A. 1986

ERASME

ERASME: A multi expert system for pavement rehabilitation
ANTOINE Jean-Luc, CORBY Olivier, PUGGELLI Marcel
A.A.T.T Conference 1989

ERASME, un projet de système expert pour l'entretien des chaussées
ALLEZ Frédéric, DAUZATS Michel, PUGGELLI Marcel
Revue générale des routes et des aérodromes. 61 (642) 1987

Systèmes de gestion et de suivi
Revue générale des routes et des aérodromes. 61 (647) 1987

ARC

Un système expert pour assister la cueillette de données relatives à l'évaluation des chaussées
PEHLIVANIDIS Michalis, LAROSE Gaston
RTAC 1988 Annual Conference

L'application des systèmes experts dans la gestion des chaussées
PEHLIVANIDIS Michalis
Centre de recherche sur les transports
Publication 497, 1986

OVERDRIVE

A knowledge-based approach to pavement recouvrement design
RITCHIE Stephen G.
Transportation Research Board 66th Annual Meeting 1987

PRESERVER

PRESERVER: A knowledge-based pavement maintenance consulting program
HAAS Carl, SHEN Helen
Second North American Conference On Managing Pavements, 1987

ROSE

ROSE: A knowledge-based expert system for routing and sealing
HAJEK Jerry J., CHONG George J., PHANG William A., HAAS Ralph C.G.
Second North American Conference On Managing Pavements, 1987

Knowledge-based expert system technology can benefit pavement maintenance
HAJEK Jerry J., CHONG George J., PHANG William A., HAAS Ralph C.G.
Ontario Ministry of Transportation and Communication
Technical report PAV-86-05, 1986

Life-cycle pavement performance modelling using a knowledge-based expert system technology
HAJEK Jerry J.
Research proposal, Department of civil engineering, University of Waterloo, Canada, 1985

PMEX

An expert system for concrete pavement evaluation and rehabilitation
HALL Kathleen T., CONNOR James M., DARTER Michael I., CARPENTER Samuel H.
Transportation Research Board 67th Annual Meeting 1988

Development of an expert system for concrete pavement evaluation and rehabilitation
HALL Kathleen T., CONNOR James M., DARTER Michael I., CARPENTER Samuel H.
Second North American Conference On Managing Pavements, 1987

Development of a demonstration prototype expert system for concrete pavement evaluation
HALL Kathleen T., CONNOR James M., DARTER Michael I., CARPENTER Samuel H.
Transportation Research Record 1117, 1987

PAVEMENT EXPERT

An expert system to evaluate concrete pavements
ALSHAWI M., CABRERA J.G.
Microcomputers in civil engineering 3, 1988

PARADIGM

State of the art of expert systems in transportation engineering
RITCHIE Stephen G.
Construction Engineering Research Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, 1986

PAMEX

Expert system for pavement maintenance management
AOUGAB Hamid, SCHWARTZ Charles W., WENTWORTH James A.

Public roads, Vol 53 No1, 1989

DIVERS

Expert systems and pavement management
HENDRICKSON Chris T., JANSON Bruce N.
Second North American Conference On Managing Pavements, 1987

Expert systems
RITCHIE Steven G., GRIVAS Dimitri A., HAAS Ralph C.G.
Second North American Conference On Managing Pavements, 1987

Application of expert systems for managing pavements
RITCHIE Stephen G.
Second North American Conference On Managing Pavements, 1987

Expert system in pavement management
RITCHIE Stephen G.
Institute of transportation studies, University of California, Irvine, U.S.A. 1986

Using expert systems in the inventory and evaluation of rural road networks
GREENSTEIN Jacob, BERGER Louis
Second North American Conference On Managing Pavements, 1987

A microcomputer-based pavement rehabilitation and maintenance management system
STEIN Alvaro, SCULLION Tom, SMITH Donald R., COX Sam
Second North American Conference On Managing Pavements, 1987

Expert systems as a part of pavement management
FLANAGAN Patrick R., HALBACH Daniel S.
Transportation Research Record 1123, 1987

Enhancing the existing pavement management systems by using expert system techniques
LEE H., GALDIERO V.
A.A.T.T Conference 1989

An expert system for pavement engineers
ZANIEWSKI John, GASCHKLE Timothy
A.A.T.T Conference 1989

An expert system for automation of pavement condition inventory data
SHEN Helen, HAAS Carl, PHANG William A., HAAS Ralph C.G.
First North American Conference On Managing Pavements, 1985

An expert system to estimate highway pavement routine maintenance work load
TANDON Rajeev P., KUMARES C. Shinha
Civil engineering system, Vol 4, 1987